振动条件下铁路继电器寿命预测研究

李文华　马思宁　沈培根　王　楠
（河北工业大学电气工程学院　天津　300130）



李文华　男　1973年生，教授，研究方向为电器可靠性及检测技术、新能源发电和并网技术。



马思宁　女　1991年生，硕士，研究方向为电器可靠性及检测技术。

摘要：铁路继电器工作中的可靠性与安全性是确保各种铁路设备正常工作的必须要求，在列车控制方面发挥着重要的作用。本文根据加速试验原理与试验条件制定了在振动应力下铁路继电器的加速寿命试验方案，并通过加速寿命试验获得了铁路继电器触点接触压降的数据。选择接触压降作为继电器性能退化特征参数，利用小波阈值法对得到的接触压降数据进行去噪处理，并建立了 EEMD-RBF 预测模型对继电器寿命进行预测。对 EEMD-RBF 与 RBF 的误差进行对比分析，结果表明 EEMD-RBF 模型预测精度更高。最后，根据预测出来的寿命，运用逆幂律方程预测出正常振动应力水平下铁路继电器的寿命。

关键词：铁路继电器　振动应力　失效试验　小波阈值去噪　EEMD-RBF 寿命预测
中图分类号：TM581

Study on Life Prediction of Railway Relay under Vibration

Li Wenhua　Ma Sining　Shen Peigen　Wang Nan
（Hebei University of Technology　Tianjin　300130　China）

Abstract: Reliability and safety of railway relay in its work is a must to ensure that the various railway equipment can work normally. As a result, railway relay plays an important role in the train control. In this paper, according to the test conditions and the principle of accelerated test, the accelerated life test plan of railway relay under vibration has been made, also the relay contact point voltage data are acquired in the accelerated life test. The contact voltage is chosen as the relay characteristic parameter indicating performance degradation and wavelett hreshold method is introduced in order to improve the quality of contact point voltage data. At the same time, EEMD-RBF model is established to predict the life of relay. By analyzing the errors between EEMD-RBF and RBF, it shows that the EEMD-RBF model has a better prediction accuracy. Finally, based on the predicted life, the inverse power law equation is used to extrapolate railway relay life under the normal vibration stress.

Keywords: Railway relay, vibration stress, degradation test, wavelet threshold denoising, EEMD-RBF life prediction

1　引言

铁路继电器是铁路设备中主要的开关器件，它是一种闭合或断开控制电路专用的多路开关。随着近年来现代工业水平的快速提高，很多机器正朝着高速、高压、高温的方向发展，技术水平快速提高的同时，工程失效的因素也逐渐增多，振动与疲劳则是其中重要的因素。如今环境因素对继电器寿命的影响越来越多，因此铁路对继电器有着严格的要求，如使用寿命长；在振动、温度等外界环境发生变化的情况下，仍能保持高的电气绝缘强度等[1]。本文利用加速寿命试验的方法，以铁路继电器为研究对象，在振动环境下对其进行性能退化和寿命预测的研究。本文的研究对象采用某型号的铁路信号继电器，如图 1 所示。

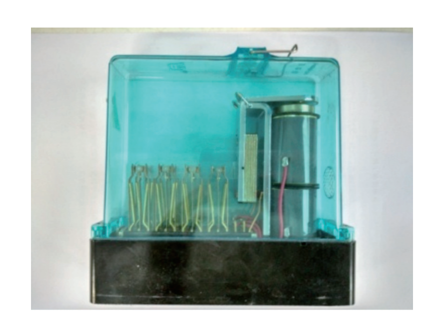


图 1　铁路信号继电器

Fig.1　Railway signal relay

2　铁路信号继电器的工作原理

信号继电器是指应用于铁路信号中的各类继电器的统称，是铁路信号控制系统中不可或缺的器件。其基本结构如图 2 所示。

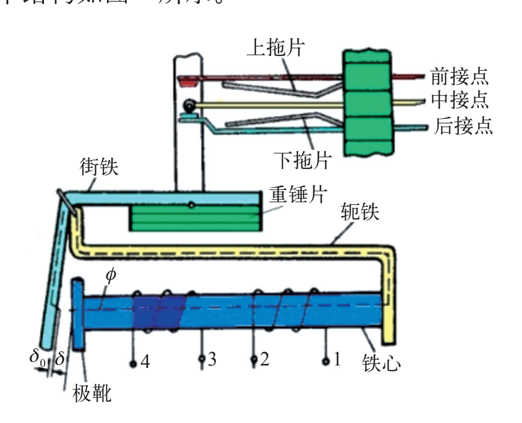


图 2　信号继电器结构示意图

Fig.2　Schematic diagram of signal relay structure

电磁系统和接点系统是信号继电器两大结构。电磁系统包括线圈、固定的铁心、轭铁以及可动的衔铁。线圈水平安装在铁心上，分为前圈和后圈。采用双线圈可以增强控制电路的适应性和灵活性，实际应用中可根据电路需要选择单线圈控制或者双线圈控制。铁心采用软磁材料，具有较高的磁通密度和较小的剩磁。衔铁由蝶形钢丝片固定在轭铁刀刃上，主要作用是实现电磁能和机械能的转换。值得注意的是，与典型的电磁继电器不同，为了增加衔铁重量，信号继电器的衔铁上还铆有重锤片，使得在线圈断电时利用重力强制将前接点断开。

接点系统包括动接点和静接点。无极继电器每组接点包括前接点、中接点和后接点，并采用两排纵列式联动结构，八组接点同步动作。

3　振动条件下铁路继电器的恒加速试验

近年来出现的加速退化试验为继电器可靠性评价提供了新的手段[2]。由于铁路继电器使用寿命较长，因此本文选用加速寿命试验的方法进行试验，并按试品失效的时间来表征，用少量的试品在相对较少的时间里完成试验。由于恒加速试验的实施过程、数据分析等相对简单，寿命评估结果较准确[3-4]，因此本文采用恒加速试验方案。

本文所用样品为某型号铁路继电器，在进行试验之前，随机抽取合格产品，检查确定继电器的外罩是否透明清晰，继电器的所有零部件有无表面缺陷、脱落等[5]。本次试验共使用的试品数为 20 个，平均分为 4 组，即每组 5 个试品在不同的振动应力水平下进行加速寿命试验。

3.1　确定失效判据与应力水平

首先，在进行试验之前要制定试品的失效判据。失效判据的确定对试验结果的影响是十分重要的，这是由于制定的失效判据不同会导致不一样的试验结果，后期的数据分析也会不一样。通过继电器工作原理可知，电磁继电器最容易失效的部位是触点，触点间接触电阻过大是造成接触失效的主要形式[6]。因此，根据继电器可靠性试验方法中失效判据的规定和项目合作企业的要求，本文选用触点接触压降大于 0.5V 作为失效判据指导试验的进行。

其次，是加速应力水平的确定，本试验的应力类型是在室温条件下的振动应力。通过查阅相关资料可知，正弦振动试验主要是用于模拟电工电子产品的运输、使用等过程，并用来研究由于振动环境对其造成的影响，故本文采用定频正弦振动。根据 GB/T7417—2010 的规定和产品的使用说明书，振

动幅值为 0.45mm，最低振动频率定为 20Hz，振动方向为垂直方向的正弦运动。根据企业要求，最高振动频率定为 100Hz。按照等应力分布的原则，在最高应力水平 x_k 与最低应力水平 x_1 之间增加两个中间应力水平 x_{m1} 和 x_{m2}，即

$$\begin{cases} x_{m1} = (2x_1 + x_k)/3 = 46.67 \\ x_{m2} = (2x_k + x_1)/3 = 73.33 \end{cases}$$

为试验方便，将 4 个振动频率水平分别调整为 20Hz、47Hz、73Hz、100Hz。综合实际试验条件和时间问题，在缺乏足够前期摸底试验数据的前提下，每组试品在不同振动应力水平下进行试验，若在一个多月后仍无明显失效情况，本文便允许停止试验，退化参数的采集时间为每隔 1h 一次。

3.2 试验设备

本次试验的振动环境是由某型号的电动式振动台提供的，如图 3 所示，目的是为铁路信号继电器的加速寿命试验提供加速应力。电动振动台是力学环境试验的重要设备，主要由振动台台体、振动控制仪、功率放大器和冷却装置等组成。铁路信号继电器作为试件放到振动台体上对其做振动加速试验，检测它的可靠性。

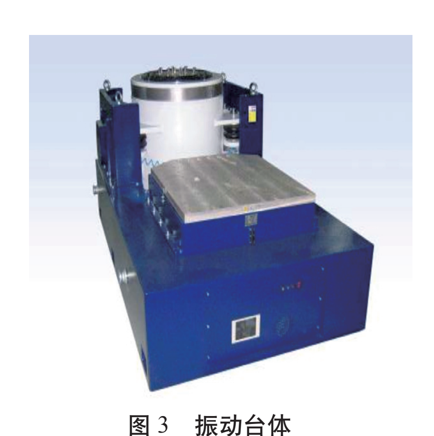


图 3　振动台体

Fig.3　Vibration table

4　铁路继电器接触压降数据预处理

本文所研究的铁路继电器有 16 对触点，包括 8 对常开触点和 8 对常闭触点。在振动应力作用下，只要有 1 对触点发生失效，就会导致整个继电器失效，本试验测试的是触点的接触压降，那么继电器的寿命取决于它的若干触点中接触电阻最大的触点寿命。

在试验过程中，由于如工业干扰等外部原因或如元件、器件内部的热骚动等内部原因，使得到的试验数据引入了噪声和干扰，这些噪声信息的存在并不合理，对建模处理的精确度造成极大的影响。因此，为减少干扰的影响，需对预测变量进行前期预处理 [7]。目前常用的小波是一种比较常见的去噪方法 [8-9]，主要为以下 3 种：相关性去噪算法、模极大值去噪算法和小波阈值去噪算法 [10]。本文采用小波阈值去噪法实现对铁路继电器最大接触压降时间序列的噪声平滑。

（1）本文选取 db4 作为小波函数对噪声信号进行 3 层分解。将 1 ～ 3 层的高频波动序列分别记为 d_1、d_2、d_3，第三层的低频趋势序列记为 a_3。三层分解模型如图 4 所示。

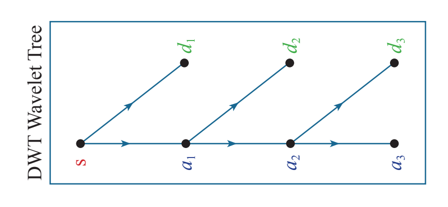


图 4　三层分解模型

Fig.4　Three layers decomposition model

（2）使用“Rigrsure”为无偏似然估计阈值类型选择各层的阈值。

（3）最后用 SNR 和 RMSE 两个指标对去噪效果进行衡量。这里以铁路继电器在振动频率 100Hz 的条件下 1# 试品的接触压降信号为例，小波去噪后的部分去噪结果见表 1。

表 1　部分去噪结果

Tab.1　Partial denoising results

时间 /h	触点接触压降 U_j/V	
	原始值	去噪后
1	0.409	0.396
2	0.427	0.37
3	0.379	0.36
…	…	…

表 2 为在振动频率 100Hz 的应力下，5 台试品触点接触压降的去噪评价指标。

表 2　去噪评价指标

Tab.2　Denoising evaluation index

评价指标	试品				
	1#	2#	3#	4#	5#
SNR/dB	55.915 6	46.973 9	48.597 6	53.743 8	50.878 5
RMSE	0.022 2	0.035 2	0.037 4	0.025 1	0.032 2

由表 2 可知，计算得到小波阈值去噪的 SNR 高达 55.915 6dB，RMSE 为 0.022 2，结果表明去噪效果良好，有助于提高后续预测过程的预测精度。

5　铁路继电器的寿命预测

5.1　EEMD 分解

经验模态分解吸取了小波变换多分辨的优势，同时克服了小波变换中需选取小波基与确定分解尺度的困难。但当分析的数据不是纯由白噪声组成的时候，EMD 分解就会出现模态混叠的现象，即出现分解混乱的情况。为此，本文提出改进算法——聚合经验模态分解（Ensemble Empirical Mode Decomposition，EEMD）。EEMD 的基本原理是利用噪声的统计特性来有效避免混叠现象。在原始信号中叠加服从（0，$(\alpha\varepsilon)^2$）正态分布的高斯白噪声，然后进行多次 EMD 分解，高斯白噪声在多次试验叠加的情况下相互抵消，原始信号中的有用信号在多次加入白噪声的试验后作为均值保留下来[11]。因此，EEMD 是对 EMD 方法的较大改进。

本文对铁路继电器触点最大接触压降时间序列 $X(t)$ 进行 EEMD 分解，过程如下：

（1）在 $X(t)$ 信号上加入白噪声。

（2）将加入白噪声的序列进行多次 EMD 分解，得到 IMF 序列。

（3）每次加入不同的白噪声序列，反复步骤（1）和步骤（2）。

（4）把分解得到的各个 IMF 的均值作为最终的结果。

5.2　EEMD 仿真结果

这里以铁路继电器在振动频率 100Hz 的条件下某一试品的接触压降信号为例，对触点最大接触压降序列进行 EEMD 分解，结果如图 5 所示。从图中可以看出，EEMD 将信号分为 8 层，模态混叠得到了抑制。

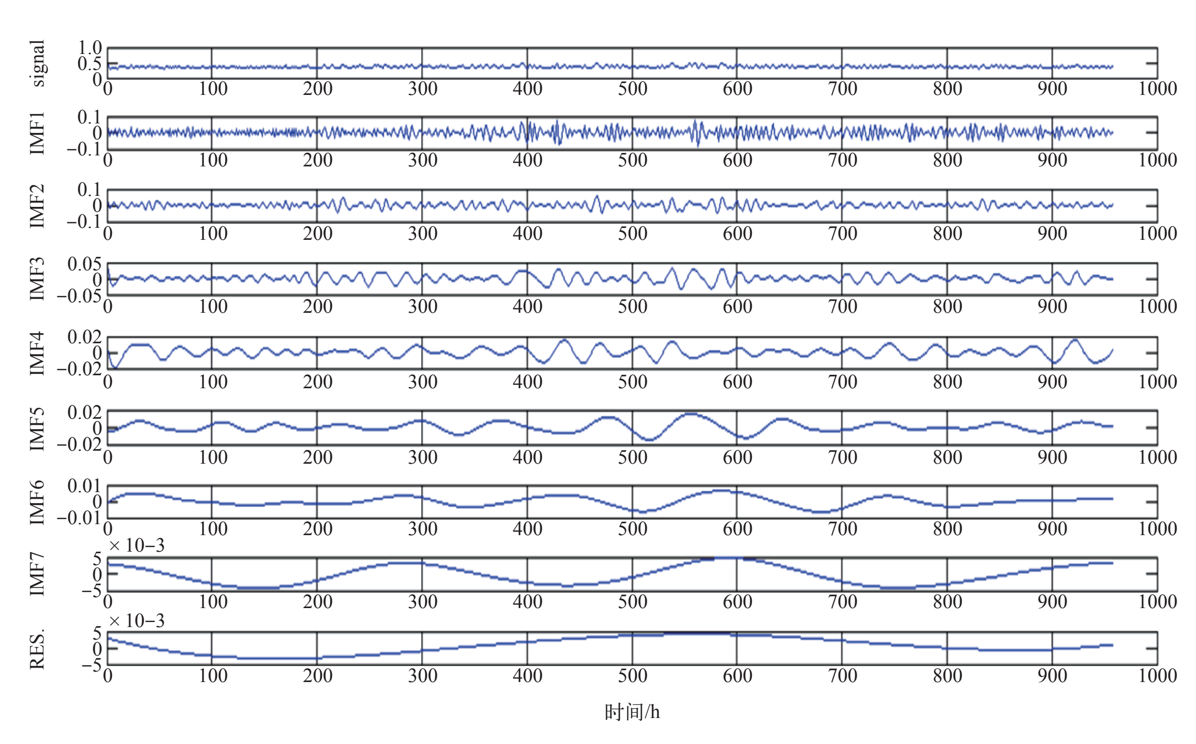


图 5　EEMD 分解结果

Fig.5　EEMD decomposition results

5.3　搭建 EEMD － RBF 神经网络预测模型

RBF 神经网络（Radial Basis Function Neural Network，RBFNN）具有最佳逼近和全局最优的性能，广泛应用于函数逼近和分类问题。RBF 神经网络是一种高效的前馈式神经网络，拓扑结构分为输入层、隐含层和输出层。其输入到输出的映射为非线性，隐含层空间到输出空间的映射为线性，RBF 网络通过非线性基函数的线性组合实现了从输入空间到输出空间的非线性转换。隐含层的 RBF 一般选用中心点径向对称且衰减的高斯函数。与 BP 神经网络相比，RBF 网络学习速度大大加快，并有效避免陷入局部极小值。利用 RBF 神经网络，对经过

EEMD 分解接触压降序列得到的 7 个 IMF 和 1 个 RES 序列分别进行预测并叠加，分解序列预测模型流程图如图 6 所示。

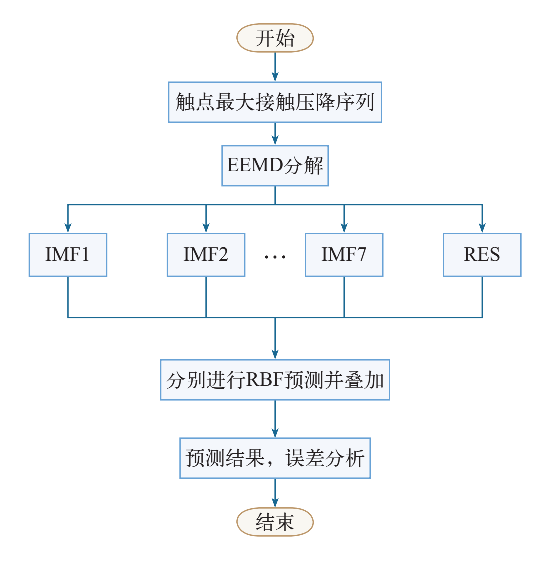


图 6　预测流程图

Fig.6　Predictive flow chart

本文用 Matlab 的神经网络工具箱构建 RBF 网络，根据理论分析构建模型如下：

（1）选取训练样本集和预测样本集。本文选取 900 个样本用于 RBF 神经网络的训练，59 个样本用作网络验证。

（2）网络参数的设置。调用 Matlab 中的 newrb() 函数构建 RBF 网络。其中，newrb() 的功能是建立一个径向基神经网络，格式为 net = newrb(*P*，*T*，goal，spread，*MN*，*DF*)。设置网络的均方误差 goal = 0.001。其中，扩展速度 spread 越大，需要的隐藏神经元越多，函数拟合越平滑；spread 设定很小，网络性能变差，并可能会出现过拟合现象。所以具体设置时要不断尝试不同的 spread 值，直至满足要求。经过多次调试，扩展速度 spread = 10 时预测精度最高。神经元的最大数目 MN 和径向基函数的分布常数 DF 为默认值。

5.4　仿真结果分析

为了验证经 EEMD 分解对 RBF 神经网络预测模型精度的影响，增加了没有经 EEMD 分解，只有 RBF 神经网络对原始序列的预测图。图 7 ～图 14 是 RBF 神经网络对 IMF 序列进行预测的结果图，图 15 是经 EEMD 分解的 RBF 神经网络预测与未经 EEMD 分解的 RBF 预测对比图。表 3 显示的是两种模型的误差，本文选取和方差 SSE 和方均误差 MSE 对其进行分析，定义如下

$$\mathrm{SSE}=\sum_{i=1}^{n}(f(i)-\hat{f}(i))^2 \qquad (1)$$

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(f(i)-\hat{f}(i))^2} \qquad (2)$$

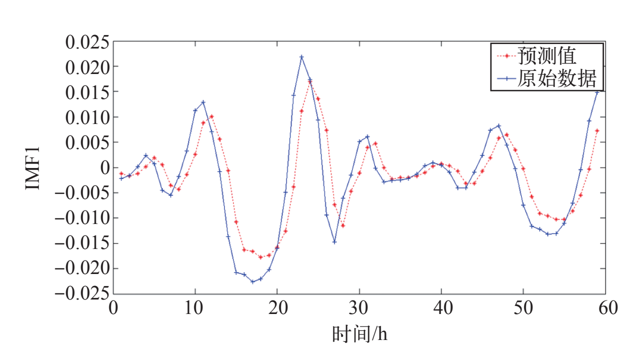


图 7　IMF1 预测值与真实值对比图

Fig.7　The IMF1 forecast compared to the real value

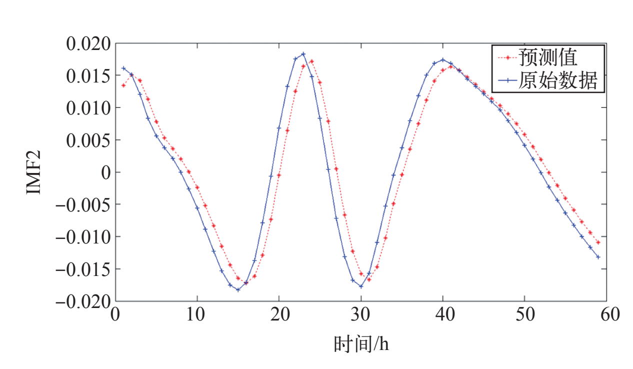


图 8　IMF2 预测值与真实值对比图

Fig.8　The IMF2 forecast compared to the real value

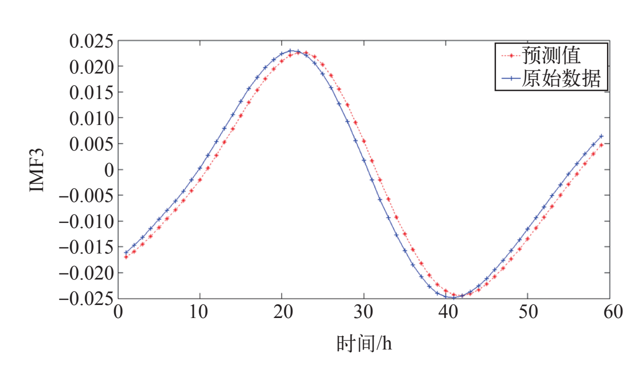


图 9　IMF3 预测值与真实值对比图

Fig.9　The IMF3forecast compared to the real value

根据仿真结果可知，EEMD-RBF 模型预测结果的各项指标都明显优于未经 EEMD 分解的 RBF 模型，由此可见 EEMD 对数据的平稳化处理较大程度地提高了 RBF 模型的预测精度。所以本文选择 EEMD-RBF 模型对铁路继电器振动加速寿命试验的 4 个不同振动应力点下的试品数据进行循环滚动预

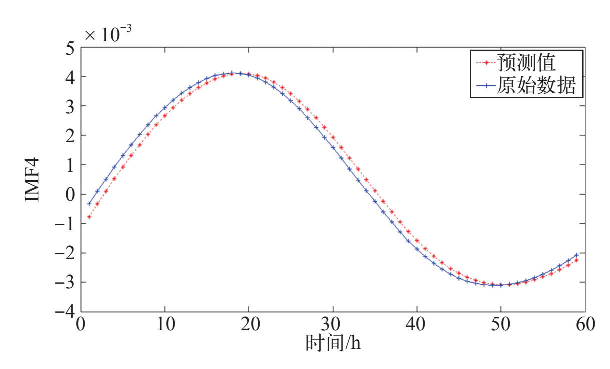


图 10 IMF4 预测值与真实值对比图

Fig.10 The IMF4 forecast compared to the real value

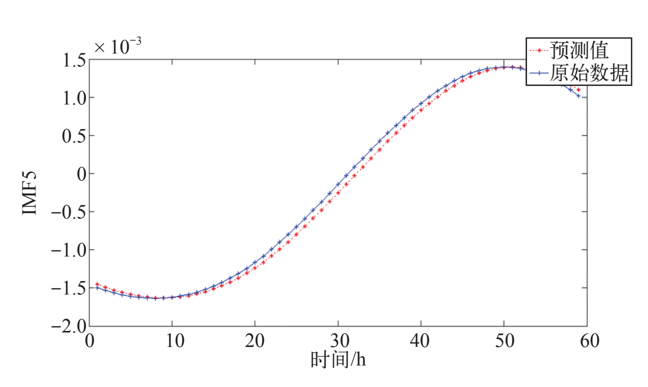


图 11 IMF5 预测值与真实值对比图

Fig.11 The IMF5 forecast compared to the real value

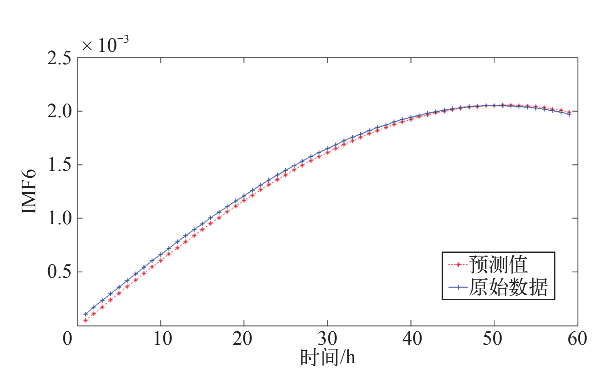


图 12 IMF6 预测值与真实值对比图

Fig.12 The IMF6 forecast compared to the real value

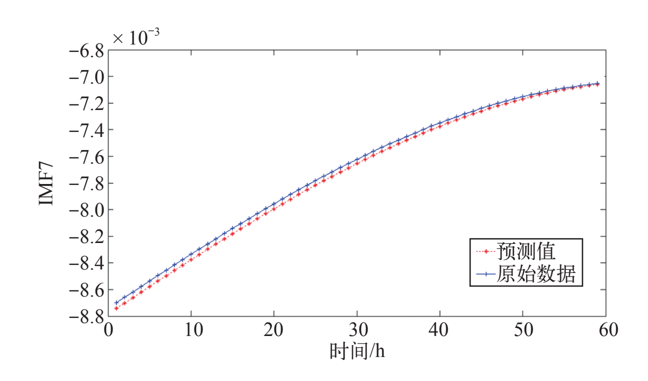


图 13 IMF7 预测值与真实值对比图

Fig.13 The IMF7 forecast compared to the real value

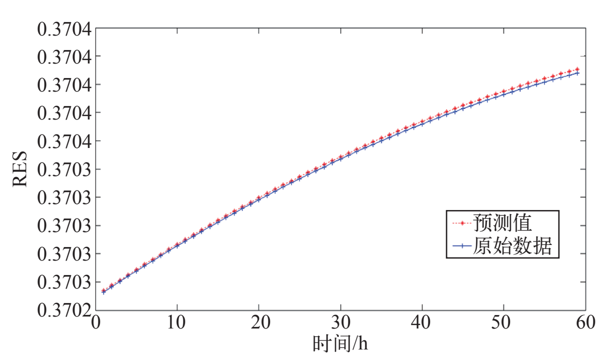


图 14 RES 预测值与真实值对比图

Fig.14 The RES forecast compared to the real value

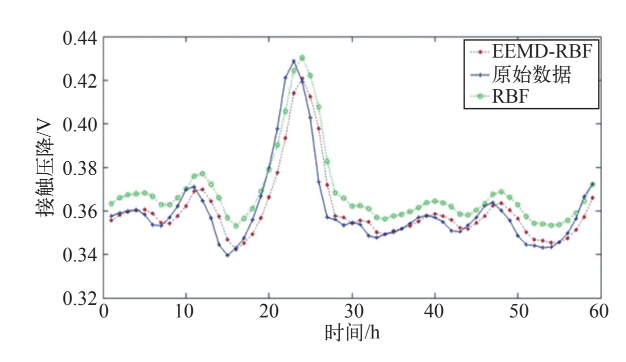


图 15 两种模型预测结果对比图

Fig.15 The comparison of the two models' prediction results

表 3 两种模型的误差

Tab.3 The error of the two models

预测模型	RBF 模型	EEMD-RBF 模型
SSE	2.39	0.69
MSE	0.040 5	0.011 7

测，得到各应力下的寿命值，见表 4。

表 4 不同振动应力下铁路继电器的寿命预测

Tab.4 Life prediction of railway relay under different vibration stress

（单位：h）

振动频率 /Hz	试品				
	1#	2#	3#	4#	5#
100	8 909	8 910	9 003	9 010	9 015
75	15 876	15 884	15 903	16 005	15 892
45	25 198	25 256	25 203	25 491	25 247
20	49 001	49 056	49 125	49 106	49 013

多步滚动预测过程中，随着预测步数的增加，预测误差也会增大，当预测模型的输入全部为预测值代替实测值时，预测的效果更差。随着模型的复杂性增加，数据处理量越大，耗时越长，很难在短

时间内得到产品的储存寿命预测结果。

5.5 正常振动应力下的寿命预测

根据本文所用型号的铁路继电器的产品使用说明书中的规定，正常工作环境中，振动频率不大于15Hz，振幅不大于0.45mm，所以继电器的退化过程相当缓慢，试验周期长，往往得不到失效数据，为了得到正常应力下的寿命值，可以通过加速寿命试验建立继电器的退化回归预测模型，外推得到正常应力水平下的预测寿命。在振动应力的作用下，铁路继电器失效寿命的逆幂律方程为

$$t=\frac{1}{dS^{\alpha}} \tag{3}$$

对上式取对数，得

$$T=a-\alpha\ln S \tag{4}$$

式中，$T=\ln t$；$a=-\ln d$。可以看出，寿命的对数与振动应力的对数呈线性关系。为了使预测结果相对保守，取各振动应力水平下试品的最小预测寿命，用最小二乘法得出待定参数 a 和 α 的估计值，$a=-\ln d=13.917\,9$，$\alpha=1.014\,5$。所以继电器寿命和振动应力间的关系式见式（5），图 16 为加速寿命曲线。

$$t=\mathrm{e}^{13.9179}S^{-1.0145} \tag{5}$$

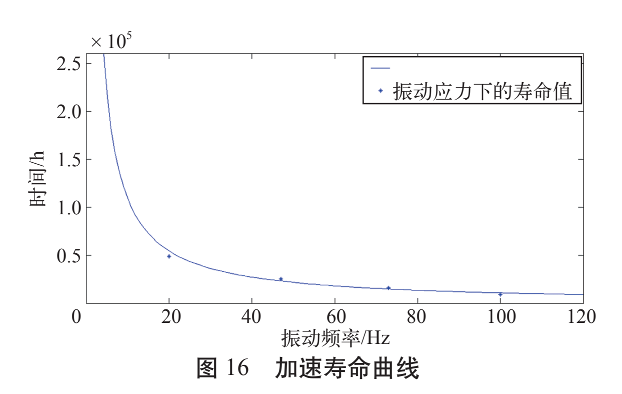


图 16　加速寿命曲线

Fig.16　Accelerated life curve

通过推出的方程可推算出铁路继电器在正常振动应力下的寿命。最后外推得出铁路继电器在振幅0.45mm，振动频率为15Hz、10Hz、5Hz情况下的寿命值分别为72 802h、109 440h、219 680h，约为8.310 7年、12.493 2年、25.077 7年。

6　结论

本文利用了在振动应力下加速寿命试验的方法，以铁路继电器为研究对象，得到了其接触压降的性能退化数据，并对继电器的寿命进行了预测。

采用集合经验模态分解（EEMD）对接触压降序列特性做深度挖掘分解，并建立了EEMD-RBF预测模型对继电器的参数进行预测。并对比了EEMD-RBF模型与RBF预测模型，仿真结果表明，EEMD-RBF预测模型的精度更高。最后用此模型对4个振动应力下的继电器分别进行滚动预测，根据推导出的逆幂律方程，外推出铁路继电器在正常振动应力水平下的寿命。

参考文献

[1] 聂畅．提高地铁车辆继电器可靠性的方法探讨[J]．电力机车与城轨车辆，2012，35(2)：78-79, 84．

[2] 钟强晖，张志华，梁胜杰．基于多元退化数据的可靠性分析方法[J]．系统工程理论与实践，2011，31(3)：544-551．
Zhong Qianghui, Zhang Zhihua, Liang Shengjie. Reliability analysis approach based on multivariate degradation data[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(3): 544-551.

[3] 陈循，张春华，汪亚顺，等．加速寿命试验技术与应用[M]．北京：国防工业出版社，2013．

[4] 陈文华，崔杰，潘骏，等．航天电连接器振动可靠性试验与分析[J]．航空学报，2003，24(4)：342-345．
Chen Wenhua, Cui Jie, Pan Jun, et al. Reliability test and statistical analysis of electrical connector under vibration stress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 342-345.

[5] 骆燕燕，王兴贵，陆俭国，等．电磁继电器贮存寿命预测理论与试验方案的研究[J]．低压电器，2005(9)：49-54．
Luo Yanyan, Wang Xinggui, Chen Jianguo, et al. Study on the prediction theory and test plan of storage life for electromagnetic relays[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(9): 49-54.

[6] 刘帼巾，陆俭国，王海涛，等．接触器式继电器的失效分析[J]．电工技术学报，2011，26(1)：81-85．
Liu Guojin, Chen Jianguo, Wang Haitao, et al. Failure analysis of contactor relay[J]. Transactions of China Eletrotechnical Soiety, 2011, 26(1): 81-85.

[7] 许文博，武晓春，邢建平．一种新的小波阈值去噪方法[J]．兰州交通大学学报，2012，31(3)：120-124．
Xu Wenbo, Wu Xiaochun, Xing Jianping. A new

method for wavelet threshold denoising[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(3): 120-124.

[8] 章浙涛，朱建军，匡翠林，等．小波包多阈值去噪法及其在形变分析中的应用 [J]．测绘学报，2014，43(1)：13-20．

Zhang Zhetao, Zhu Jianjun, Kuang Cuilin, et al. Multi-threshold wavelet packet de-noising methodand its application in deformation analysis[J]. Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica, 2014, 43(1): 13-20.

[9] 吴光文，王昌明，包建东，等．基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法 [J]．电子与信息学报，2014，36(6)：1340-1347．

Wu Guangwen, Wang Changming, Bao Jiandong, et al. A wavelet threshold de-noising algorithm based on adaptive threshold function[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6): 1340-1347.

[10] 朱建军，章浙涛，匡翠林，等．一种可靠的小波去噪质量评价指标 [J]．武汉大学学报，2015，40(5)：688-694．

Zhu Jianjun, Zhang Zhetao, Kuang Cuilin, et al. A reliable evaluation indicator of wavelet de-noising[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 688-694.

[11] 杨永锋，吴亚锋．经验模态分解在振动分析中的应用 [M]．北京：国防工业出版社，2013．

（上接第 7 页）

Lin Zhuying. An analytic algorithm for DuHamel integral by generalized functions[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1994, 22(4): 30-35.

[23] Maksiejewski J L. Losses in conductors due to current surges taking the skin effect into account[J]. IET Proceedings Generation Transmission and Distribution, 1990, 137(2): 80-84.

[24] Maksiejewski J L. Evaluation of thermal characteristics of conductors under surge currents taking the skin effect into account[J]. IET Proceedings Generation Transmission and Distribution, 1990, 137(2): 85-91.